

RLS(Recursive Least Square)를 이용한 전압안정도 지수 평가

전웅재, 이병준
고려대학교

Estimation of Voltage Instability Index Using RLS(Recursive Least Square)

Woongjae Jeon, Byongjun Lee
Korea University

Abstract - A Voltage Instability Predictor(VIP) estimates the proximity of a power system to voltage collapse in real time. Voltage Instability Index(Z-index) from VIP algorithm is estimated using LS(Least Square) method. But this method has oscillations and noise of result due to the system's changing conditions. To suppress oscillations, a larger data window needs to be used. In this paper, I propose the new other method which improves that weakness. It uses RLS(Recursive Least Square) to estimate voltage instability index without a large moving data window so this method is suitable for on-line monitor and control in real time. In order to verify effectiveness of the algorithm using RLS method, the method is tested on HydroQuebec system in real time digital simulator(HYPERSIM)

임피던스 제적을 통해 전압 안정도 측면에서 사고의 심각성을 판별하게 된다.

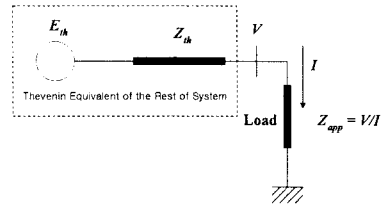


그림 1. 부하모선에서의 테브닌 등가회로

전력 계통에서의 최대전력전달 조건은 부하의 임피던스와 계통 임피던스가 같게 될 때이다.

$$|Z_{th}| = |Z_{app}| \tag{1}$$

다시 말해, 식(1)의 조건이 만족되는 순간을 전압 붕괴점으로 간주할 수 있다. 안정한 상태에서 계통 임피던스에 비해 큰 값을 갖는 부하 임피던스는 계통의 상태가 전압 붕괴점에 가까워짐에 따라 부하 임피던스는 계속 줄어들면서 결국 전압 한계점에서 두 임피던스는 같은 값을 나타내게 된다. 그림 1.의 축약된 테브닌 등가회로에서 회로방정식을 세우면 식 (2)와 같다.

$$\bar{E}_{Th} = \bar{V} + \bar{Z}_{Th} \bar{I} \tag{2}$$

이 식의 변수들을 $\bar{E}_{Th} = E_r + jE_i$, $\bar{Z}_{Th} = R_{Th} + jX_{Th}$, $\bar{V} = u + jw$, $\bar{I} = g + jh$ 로 놓으면 식 (2)는 행렬식으로 표현하면 (3)으로 변형된다.

$$\begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Th} \\ X_{Th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -g & h \\ 0 & 1 & -h & g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} \tag{3}$$

H X Y

식 (3)을 살펴보면 g, h, u, w 값을 알고 있다 하더라도 식의 수가 모자라서 단독으로는 4개의 변수에 대해 풀 수 없다. 따라서 최소제곱법(Least Square)를 이용하여 연속되어 측정되는 전압, 전류 값을 무빙 데이터 윈도우로 구성하면 식(4)와같이 나타낼 수 있고,

1. 서 론

최근 우리나라를 비롯하여 전 세계적인 전력산업의 구조개편으로 인해 계통 운영자들이 계통의 신뢰도와 안정도 향상을 위한 운영보다는 더 경제적인 급전을 중시하고 있다. 이러한 이유로 그 운용 또한 전력계통의 한계점에 가깝게 운용되고 있고, 이로 인해 최근 북미와 유럽의 잇따른 광역정전을 초래하였다. 그러므로 전력산업에 경제성을 추구하기 위해서는 신뢰도와 안정도를 향상시키는 것이 우선되어야 한다.

일반적으로 현대 전력계통의 운영을 위해서는 각 개별 사고에 대한 적절한 대응법이 사전에 마련되어 있어야 하며, 우발 상황에 대해 운영자가 대처 할 수 있는 시간의 확보가 매우 중요하다. 이러한 우발상황에 운영자가 빠르게 대처하기 위하여 계통의 실시간 감시가 요구되게 되고, 최근 개발된 PMU(Phasor Measurement Unit)의 발달로 인해 On-line 감시 체계에 큰 반향을 불러일으키고 있다. 이는 기존의 SCADA/EMS 데이터를 바탕으로 한 안정도 평가 알고리즘에서 갖고 있던 동기 데이터 수집의 어려움과 장시간 계산의 단점을 보완한 실시간 On-line 계통 안정도 평가 및 보호 시스템 구축을 가능하게 하였다. 이 중 실시간 측정 기기에서 제공하는 제한된 지역 정보만을 이용한 새로운 실시간 전압안정도 감시 방안인 VIP(Voltage Instability Predictor) 알고리즘이 대표적이다.

2. 본 론

2.1 LS(Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘

온라인 감시를 위한 VIP 알고리즘의 원리를 살펴보면, 계통의 변화에 따라 부하의 임피던스가 테브닌 임피던스에 가까워진다는 사실에 착안하여, 시간에 따른 부하의

각 스텝마다 동시에 계산되는 부하임피던스와 비교해 나가면 계통의 전압안정도를 연속적으로 감시할 수 있게 된다.

$$X = (H^T H)^{-1} H^T Y \quad (4)$$

2.2 RLS(Recursive Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘

LS(Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘은 테브닌 임피던스를 추적하는데 있어 필연적으로 결과물에 오실레이션이나 노이즈가 발생하게 된다. 따라서 이를 억제하기 위해서 매우 큰 무빙 데이터 윈도우를 사용해야 하고, 이러한 이유로 데이터 윈도우를 저장할 데이터 메모리가 필요하게 되며, 좋은 결과값을 얻기 위해서 무빙 데이터 윈도우의 사이즈를 적절히 설정해 주어야 한다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 회귀최소제곱법인 RLS(Recursive Least Square)를 이용하게 된다.

최소제곱법을 이용한 알고리즘의 목적은 본래의 신호와 추정된 신호 간의 차이의 제곱한 수들의 합이 최소가 되도록 하는 것이다. 이때 매 시간마다 새로운 측정 데이터가 들어온다면 최소제곱법 문제는 RLS(Recursive Least Square)의 형식으로 계산할 수 있게 된다. 결국 RLS(Recursive Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘은 수식 (5)로 표현된다.[3]

$$X_{n+1} = X_n + G_{n+1}(Y_{n+1} - H_{n+1}X_n) \quad (5)$$

$$G_{n+1} = P_n H_{n+1}^T (I + H_{n+1} P_n H_{n+1}^T)^{-1}$$

$$P_{n+1} = (I - G_{n+1} H_{n+1}) P_n$$

이때 시간이 지날수록 $P(k)$ 의 값이 0이 되어 오래된 측정값(old measurements)의 비중이 커지는 것을 방지하기 위하여 Forgetting Factor인 $\lambda (0 < \lambda \leq 1)$ 를 사용하게 되면 수식 (6)을 얻을 수 있게 된다.

$$X_{n+1} = X_n + G_{n+1}(Y_{n+1} - H_{n+1}X_n) \quad (6)$$

$$G_{n+1} = P_n H_{n+1}^T (\lambda I + H_{n+1} P_n H_{n+1}^T)^{-1}$$

$$P_{n+1} = (I - G_{n+1} H_{n+1}) P_n / \lambda$$

수식 (6)에서 I 는 단위행렬이며, λ 는 0과 1사이의 Forgetting Factor 값이다. 수식 (6)으로 구한 n 번째 타임 스텝의 추정값 X_n 을 구하여 테브닌 임피던스 값 (Z_{th})을 구하고, n 번째 타임 스텝의 전압과 전류를 이용하여 부하의 임피던스값(Z_{app})을 구하여 이 두 값의 비인 전압안정도 지수를 구하게 된다. 이때 수식 (6)의 알고리즘 연산을 위해서 추정 파라미터인 X 의 초기치와 측정 데이터로 이루어진 P 행렬의 초기값을 설정해 주어야 한다. 즉 최초 연산을 위해서 X_0 와 P_0 값의 설정이 필요하다.

LS(Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘의 경우 무빙 데이터 윈도우를 작게 설정할 경우 시스템의 변화에 결과값이 민감하게 반응하지만 무빙 데이터 윈도우의 크기를 크게 잡으면 시스템의 변화에 둔감해지는 대신 노이즈가 적은 부드러운 결과값을 얻을 수 있다. 이와 마찬가지로 수식 (6)의 λ 는 0과 1사이의 Forgetting Factor 값으로서 이 값의 크기에 따라 계통 상태의 민감도에 영향을 미치게 된다. 즉 이 값이 작아질수록 새로운 측정 데이터의 비중이 더 커지게 되어 시스템의 작은 변화에도 민감하게 반응하며, 반대로 λ 값이 커지게 되면 시스

템의 변화에는 둔감하나 오실레이션이나 노이즈가 줄어든 부드러운 결과값을 얻을 수 있게 된다. 결국 감시하고자 하는 시스템의 상황과 특성에 따라 적절한 λ 값의 선택이 필요하다.

또한 RLS(Recursive Least square)를 이용하여 구현한 VIP 알고리즘을 사용하면 무빙 데이터 윈도우를 저장할 장치가 불필요할 뿐만 아니라 매 시각 들어오는 측정값을 바탕으로 바로 이전의 타임스텝의 결과값을 이용하여 테브닌 임피던스 값을 추정하기 때문에 온라인으로 실시간 감시(Monitoring)를 하거나 제어(Control)하는 데 있어 더 적합한 방식이라 할 수 있다.

게다가 LS(Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘의 경우 수식 (4)에서 $\sum_{k=1}^n H_k^T H_k$ 을 계산하기 위해서 필연

적으로 4×4 역행렬 계산을 해야 하지만 RLS(Recursive Least Square)를 이용한 수식 (6)의 경우에는 $G_{n+1} = P_n H_{n+1}^T (\lambda I + H_{n+1} P_n H_{n+1}^T)^{-1}$ 의 계산 시 $(\lambda I + H_{n+1} P_n H_{n+1}^T)^{-1}$ 이 2×2 행렬이기 때문에 역행렬 계산의 시간을 단축시킬 수 있게 된다.

2.3 HydroQuebec System에서의 사례연구

2.2절에서 소개한 RLS(Recursive Least Square)를 이용하여 구현된 VIP 알고리즘을 검증하기 위해 HydroQuebec System을 선정하였다. 실시간 디지털 시뮬레이터인 HYPERSIM에서 HydroQuebec System에 전압 불안정 현상 시나리오를 적용함으로써 전압안정도 지수의 변화를 관찰하였다.

그림 2.에서 볼 수 있듯이 HydroQuebec 계통은 남부지역의 대규모 부하단과 북부지역의 발전단이 장거리 송전선로로 이어져 있다. 이는 한전계통이 수도권의 대규모 부하단과 그 밖의 발전지역이 몇 개의 용통선로로 이어져 있는 상황과 매우 흡사하다. 반면 한전계통의 발전기들은 대부분 원자력이나 화력이 주축인 것에 비해 HydroQuebec 계통의 발전단은 대규모의 수력발전을 하여 퀘벡이나 몬트리올 같이 일부 지역에 집중되어 있는 부하단에 장거리 송전을 하고 있다. 이렇듯 한전계통과의 많은 유사점 때문에 한곳에 밀집된 부하단을 감시함으로써 전압 불안정 현상을 모의하기에 HydroQuebec 계통은 최적의 조건을 가지고 있다.

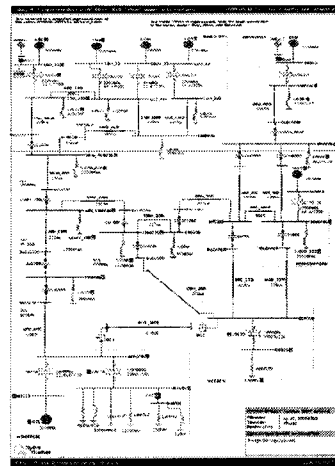


그림 2. HydroQuebec System

VIP 알고리즘의 명확한 검증과 좋은 결과값을 얻기 위해서는 부하증가 시나리오에 적용하는 것이 가장 적합하

다. 하지만 실시간 디지털 시뮬레이터인 HYPERSIM에서는 일정한 비율로 자동으로 증가하는 부하모델을 지원하지 않기 때문에 불가피 하게 직접 부하증가 시나리오를 만들어야 한다.

연속적이지는 않지만 브레이커를 이용하여 0.5초마다 적은 양의 유효전력과 무효전력을 소비하는 부하를 연결하도록 시간 파라미터를 세팅해 주어 부하증가로 인한 전압붕괴 시나리오를 만들었다.

HYPERSIM을 이용하여 HydroQuebec 계통의 MTL25 모선에 10초부터 30초까지 20초 동안 부하량을 100% 증가시켰을 경우 감시모선 MTL25의 전압값은 그림 3과 같다.

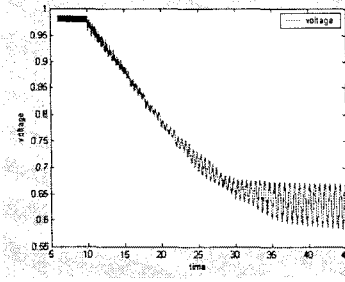


그림 3. 부하증가시 MTL25 모선의 전압값 변화

10초 이후부터 부하 증가로 인한 전압강하 현상이 발생되어 약 30초 이후에는 전압값이 0.7 pu 이하로 떨어지며 진동하는 모습을 관찰할 수 있다.

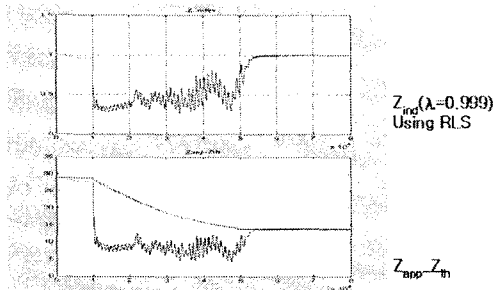


그림 4. $\lambda=0.999$ 일 경우 결과값

이때 초당 취득되는 2000개의 접압, 절류 페어저 정보 데이터를 통해 RLS(Recursive Least Square)를 이용하여 수식 (6)에 의한 전압안정도 지수의 결과값은 그림 4와 같다. 이때 λ 값을 0.999로 놓았을 경우, 부하량이 증가함에 따라 부하 임피던스 값은 시간이 지남에 따라 점차 줄어들고, 테브닌 임피던스값은 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 결국 약 55000 타임 스텝(27.5초) 이후에는 두 값이 같아지게 되는 것을 알 수 있다. 이 때문에 두 값의 비인 전압안정도 지수, Z-index는 10000 타임 스텝(10초) 이후부터 점차 증가하다가 약 55000 타임 스텝(27.5초)부터 1을 표시하게 되고 이 시점부터 계통의 전압 안정도는 매우 좋지 않고 전압붕괴 현상이 일어나고 있음을 의미하게 된다.

3. 결 론

VIP(Voltage Instability Predictor) 알고리즘은 계통의 전압 안정도를 평가하기 위해서 계통 전체의 데이터가 아닌 지역 감시 모선의 전압, 절류 페어저 정보를 통하

여 테브닌 등가 회로를 구성하고 테브닌 등가 임피던스를 추정함으로써 전압 안정도를 판별하는 기법이다. 이때 한정된 데이터를 이용하여 테브닌 임피던스 값을 추정하기 위해서 LS(Least Square)라는 수학적 기법을 사용하게 된다. 하지만 최소제곱법의 사용으로 인해 매 시간마다 무빙 데이터 윈도우를 저장해야 하고, 그 크기를 결정하는 것이 필요하다. 이를 보완하고자 본 논문에서는 RLS(Recursive Least Square)를 이용한 새로운 방법을 소개하였다. RLS(Recursive Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘을 사용 시 보다 나은 결과를 위해서 LS(Least Square)를 이용한 방식에서 무빙 데이터 윈도우의 크기를 설정하는 것과 마찬가지로 적절한 Forgetting Factor 값의 설정이 필요했지만 연속적인 무빙 데이터 윈도우의 생성과 저장이 필요 없이 바로 전단계의 결과값과 현재 측정되는 데이터를 이용하여 전압안정도 지수를 계산할 수 있고, 또한 기존의 방식이 매번 타임 스텝마다 4x4 역행렬 계산이 필요했지만 RLS(Recursive Least Square)를 이용한 알고리즘에서는 2x2 역행렬 계산을 하게 되어 계산량이 줄어들기 때문에 실시간으로 전압의 안정도를 온라인 감시, 제어하는 데 있어 더 적합한 방식을 알 수 있었다.

앞으로 본 논문에서 제안한 RLS(Recursive Least Square)를 이용한 VIP 알고리즘을 이용한다면 단일 변전소 환경 내에 전압안정도 지수산출하고, 이를 통해 실시간으로 전압과 무효전력을 적절히 감시하고 제어하는 변전소의 자동화 흐름에 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김상암, 이병준, "계통 지역정보를 이용한 전압안정성 감시 및 보호계전기예의 적용"
- [2] K.T Vu et al. "Voltage Instability Predictor(VIP) -Method and system for performing adaptive control to improve v oltag e stability in power systems", United State Patent No. US6,219,591 B1, Apr. 17, 2001
- [3] Iven Mareels, Jan Willem Polderman, "Adaptive System an Introduction", Birkhauser, 1996
- [4] S.A. Soliman, H.K. Temraz, S.M. El-Khodary, "Power S ystem Voltage Stability Margin Identification Using Local M easurements", Power Engineering, 2003 Large Engineering C onference